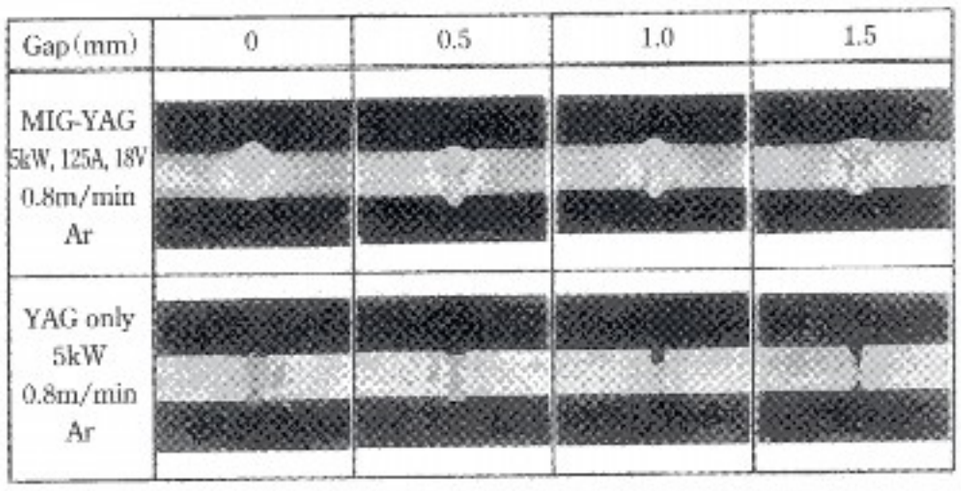


図36　レーザー単独溶接とハイブリッド溶接ギャップに対する裕度[25]

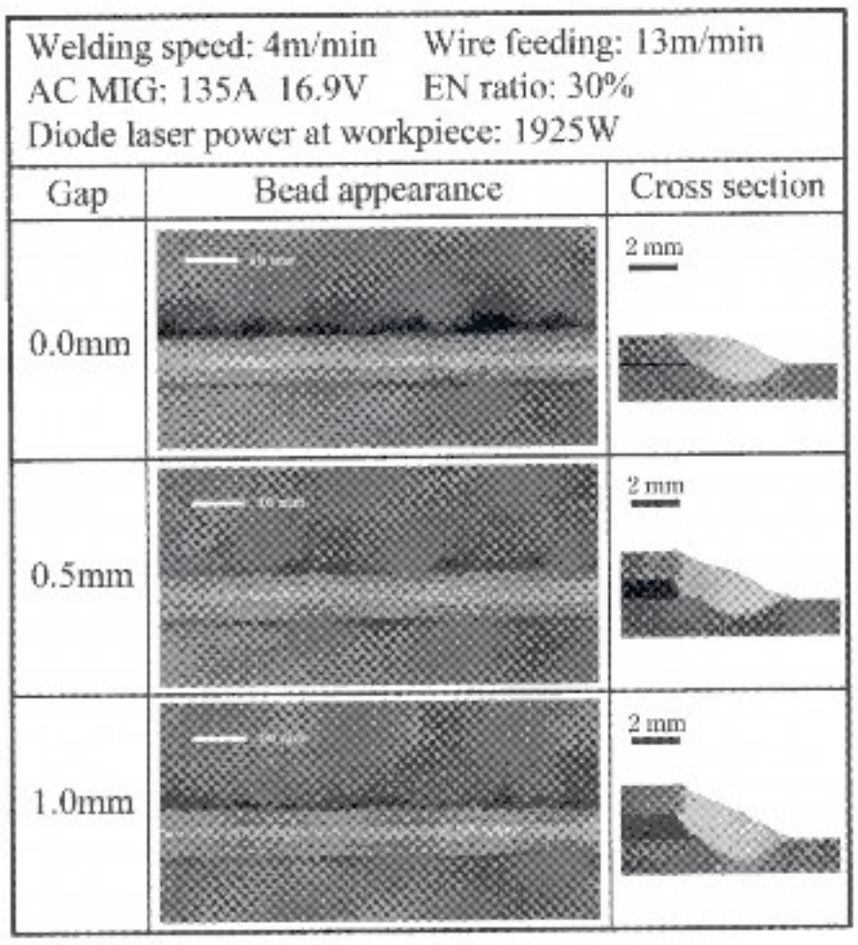


図37　ハイブリッド溶接による重ね隅肉溶接におけるギャップ裕度（A5052,1.2mm + 1.5mm，Wire : A5356，CO_2 Laser : P =:2.5kW，v =:4m/min，AC MIG Arc:I =:130A，EN比:30％）[26]

クハイブリッド溶接について示す．レーザー単独では僅か0.5mmのギャップでもビード表面部が凹み健全な溶接部が得られない．これに対し，ハイブリッド溶接では1.5mmのギャップがあっての安定な溶接が可能である．

重ね隅肉溶接図では，レーザー単独溶接の場合許容板間ギャップは上板の厚さの10％程度と云われている．図37は炭酸ガスとACMIGアークを組み合わせたハイブリッド溶接における重ね隅肉溶接における板間ギャップの許容裕度を示す．上板厚の80％以上のギャップが存在しても安定な隅肉溶接部が得られる．

以上のように，レーザー／アークハイブリッド溶接ではギャップの変動があっても安定した溶接が可能となる．さらに，ハイブリッド溶接ではポロシティの発生が低減するとの報告もある[25]．

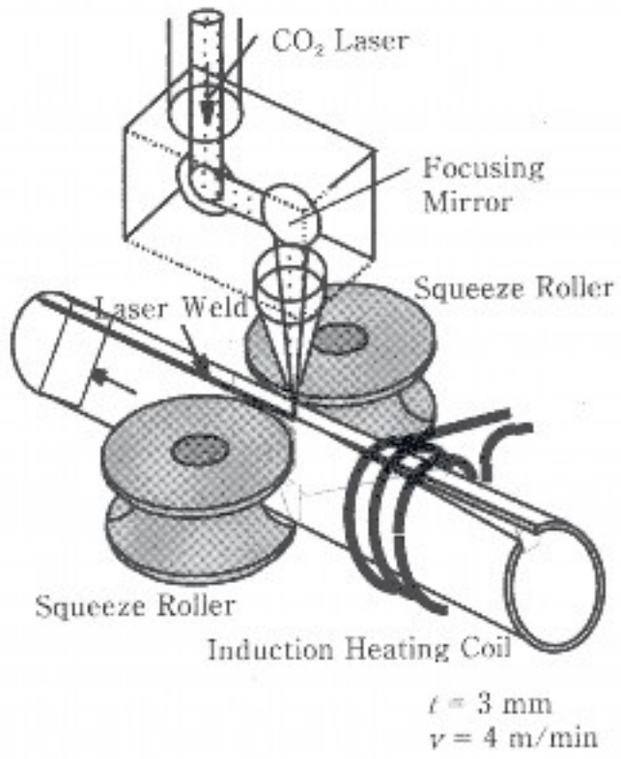


図38　レーザー／高周波ハイブリッド溶接によるステンレスパイプの製造
（(株) 住友金属工業提供）

レーザー／アークハイブリッド溶接が実用化する前から，我が国ではレーザーと高周波加熱を組み合わせたハイブリッド溶接法が鉄鋼業界で実用化されている．図38は，ステンレスパイプの製造におけるレーザー／高周波ハイブリッド溶接法の概要を示す．従来は，TIGアークによる溶融溶接あるいは高周波による固相圧接が使われていた．しかし，レーザーと高周波加熱をハイブリッド化することにより，溶接速度と品質の向上が図られるようになった．

最近，欧州でもレーザー／高周波ハイブリッド溶接が自動車用パワートレイン部品の溶接に使われている．これらの部品には，硬度の高い高炭素鋼が用いられるが，レーザー溶接のように急速凝固を伴う溶接では割れが発生しやすい．レーザー／高周波ハイブリッド溶接では，冷却速度が緩和されるので割れ発生を防止できる．

10．レーザー溶接の産業応用

現在，レーザー溶接は種々の産業分野で生産に使われている．以下に，産業別にレーザー溶接の応用例を示す．

10.1　自動車産業

世界的に見て，レーザー溶接は自動車業界で最も広く適用されていると云えよう．自動車業界にレーザー溶接技術が導入された初期の頃は，自動車用電装品の溶接が中心であったが，現在ではボディの溶接にも広く応用されている．以下に幾つかの例を紹介する．

図39はレーザー溶接された自動車用マグネットクラッチプーリーを示す．以前は，プーリー製造に際して，

図11で求めたプラズマ温度（3,280K）ならびにMgの中性原子線（333.668nm）と1価のイオン線（280.270nm）の相対強度を用いて，得られた電子密度は$n_e = 1.85 \times 10^{13} 1/cm^3$である．このように，$1.0 \times 10^6 W/cm^2$程度のパワー密度のYAGレーザー照射で発生する金属プラズマ（この場合はAlプラズマ）の温度は試料のアルミニウムの沸点（2,770K）より500K程高い弱電離プラズマである．

5．シールドガスプラズマの温度

YAGレーザー溶接で使用する程度のパワー密度ではシールドガスはプラズマ化しないが，炭酸ガスレーザー溶接ではアルゴンをシールドガスに使うとアルゴンプラズマが発生する．

塚本ら[2,12]は，炭酸ガスレーザー溶接におけるレーザー誘起プラズマの独自な分光学的観測を行った．先に述べたように，レーザー誘起プラズマには試料より蒸発した金属プラズマとシールドガスプラズマの2種がある．この2種のプラズマ発生状態を観察するために，図12に示すスペクトル写真法を開発した．

この方法では，実際のプラズマ像を2分割して特定の波長に設定した2台のモノクロメーターに導入し，モノクロメータ出射スリットから出た像をイメージインテンシファイヤーで増幅してCCDカメラに取り込む．図13に炭酸ガスレーザー溶接におけるレーザー誘起プラズマの通常写真像とスペクトル別写真像を示す．

アルゴンシールドプラズマは加工ヘッドノズル直下にレーザービーム照射軸に沿って対象な楕円球状態に形成され，中心部は1価のアルゴンイオンが存在しその周辺は励起された中性アルゴン原子で取り囲まれている．また，試料表面からは鉄の励起された中性原子スペクトルが試料上方へ向かって噴出している様子が見られる．これより，炭酸ガスレーザー溶接においては，ノズル直下では

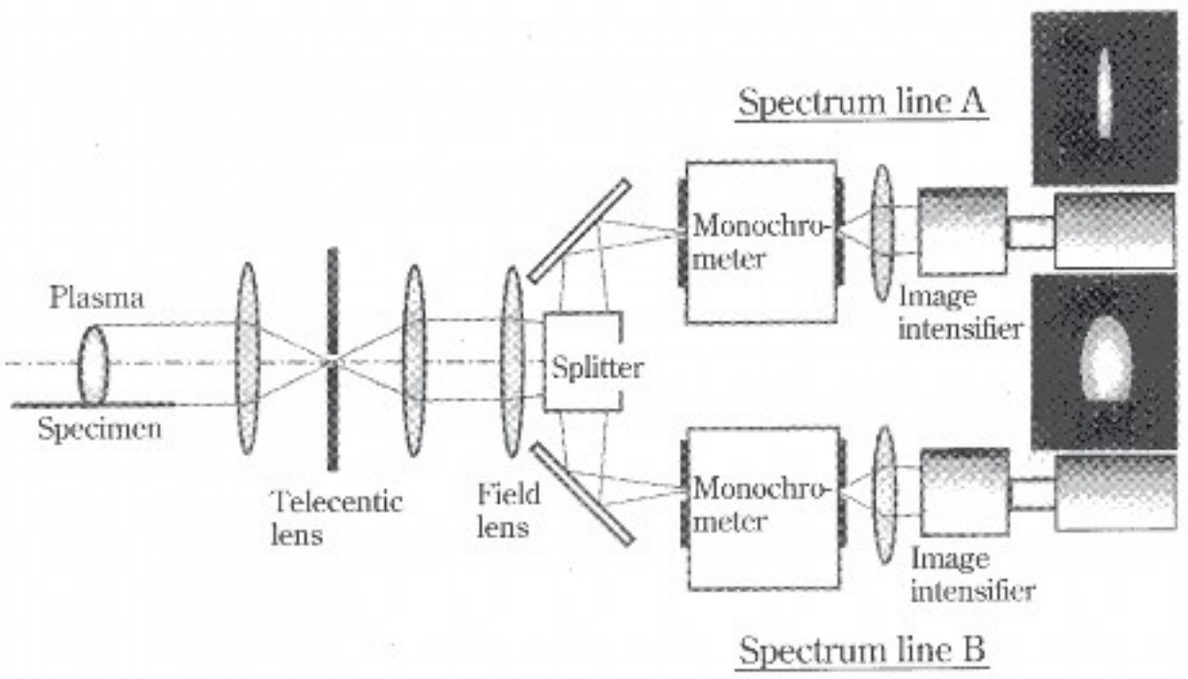
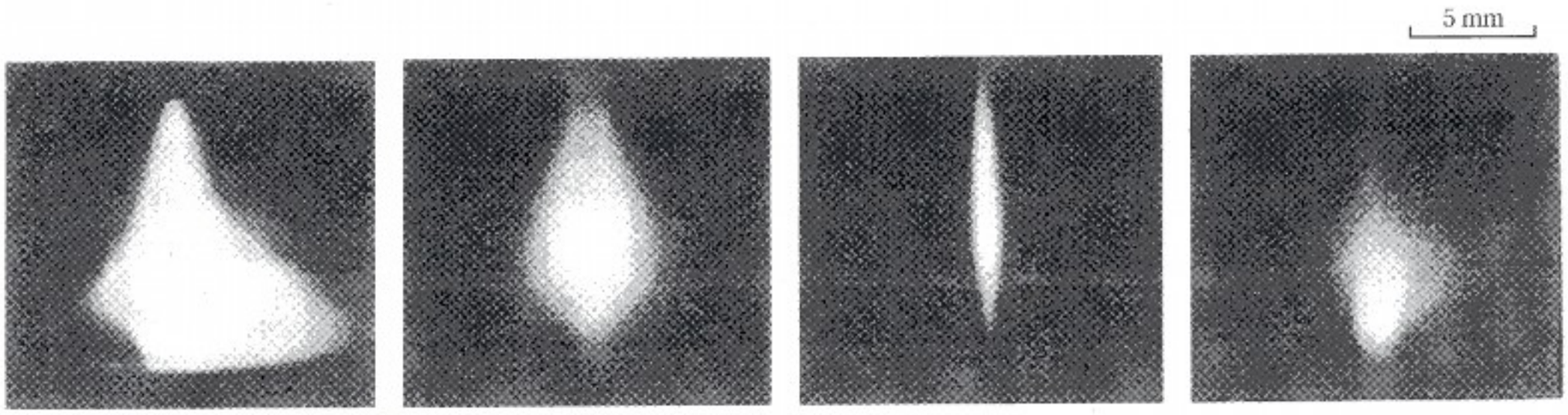


図12　スペクトル写真撮影法[12]



(a) Normal image　(b) Ar atom image (Ar I : 696.5 nm)　(c) Ar iom image (Ar II : 480.7 nm)　(d) Fe atom image (Fe I : 381.5 nm)

図13　炭酸ガスレーザー溶接におけるレーザー誘起プラズマとそのスペクトル別写真像[12]
（出力：5kW，シールドガス：Ar，流量：50l/min）

純アルゴンプラズマが，試料表面部では純粋の金属プラズマが形成されており，中間領域ではシールドガスプラズマと金属プラズマが混合した状態であることが分かる．

前掲の図6に示したように，連続レーザー溶接では時間的に金属蒸気の噴出方向が変動するので分光計測は容易ではない．

塚本ら[12]は，時間的・空間的に安定なレーザー誘起アルゴンプラズマを作るために，図14に示す方法を用いた．すなわち，レーザー加工ヘッドからアルゴンガスを流した状態で，下方に配置した電極間でアークを点弧し，炭酸ガスレーザーを照射すると楕円球状の大きなアルゴンプラズマが加工ノズルの下に安定に形成される．プラズマ球は浮力により上方に向かう力が働くが，下方に吹き出すシールドガスにより，空間に安定に静止する．アルゴンプラズマ形成後アークを消弧し，分光によるプラズマ温度測定を行った．図15にこの方法で計測されたアルゴンプラズマの等温線分布を示す．

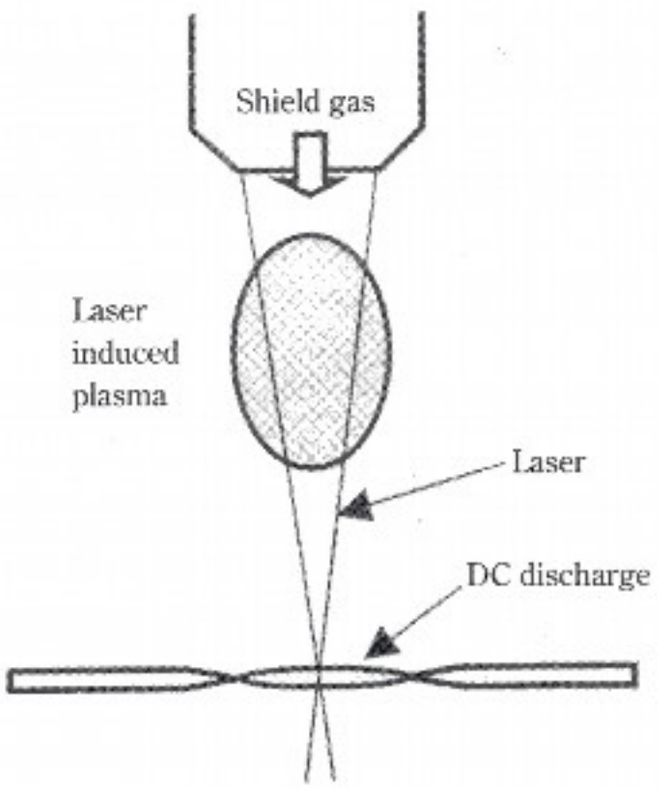


図14　シールドガスプラズマの安定形成法[12]

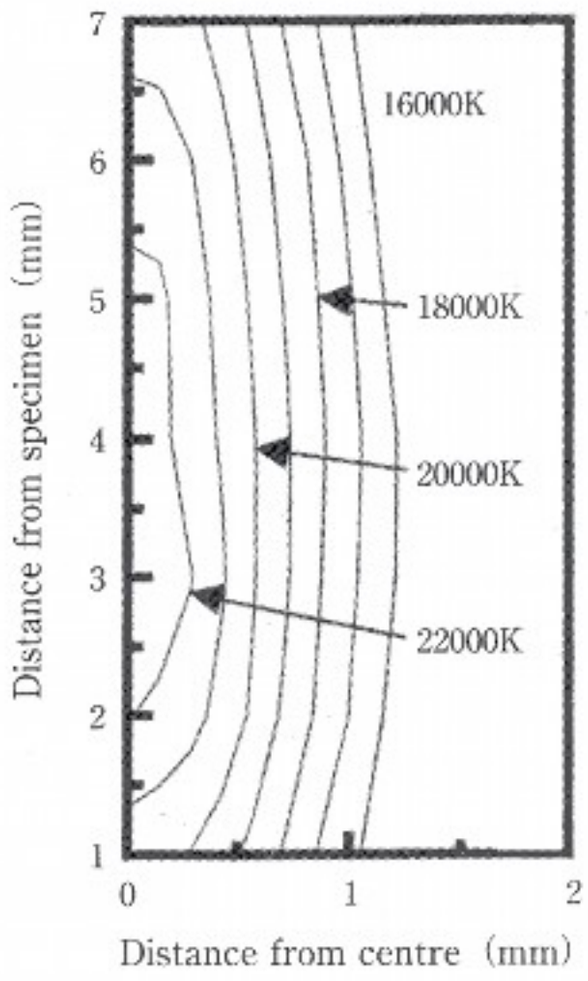


図15　レーザー誘起Arプラズマの等温線分布[12]
（出力：5kW，シールドガス：Ar）

以上述べたように，炭酸ガスレーザーによるシールドガスプラズマの温度は，前項に述べたYAGレーザー誘起金属プラズマの温度に比べてかなり高い．しかし，実際のプラズマでは電離電圧の高いアルゴンプラズマと電離電圧の低い金属プラズマの混合領域があるため，試料に近いほどプラズマ温度は低下するものと考えられる．

なお，計測された純アルゴンプラズマの温度は高々25,000Kであるので，前掲図2より電子密度は10^{17}個/cm^{3}程度である．図1に示したように，プラズマが炭酸ガスレーザーをカットオフするに必要な電子密度は10^{19}個/cm^{3}であるから，炭酸ガスレーザービームはアルゴンプラズマ中に十分浸透出来る．

6．レーザー誘起プラズマによるビーム吸収機構

全項に述べたように，レーザー加工中に形成されるシールドガスプラズマおよび金属プラズマの電子密度は，入射レーザービームをカットオフするに必要な電子密度よりは遥かに低い．しかし，レーザー誘起プラズマが発生するとレーザービームパワーは試料表面に届きにくくなることが経験的に知られている．この傾向は波長の長いレーザーほど顕著になる．このため，実際のレーザー溶接などでは，プラズマをガス流で吹き飛ばす方法（プラズマコントロールと云う）や電離しにくいヘリウムガスをシールドガスに採用している．

プラズマ振動数よりも高い振動数の外部電磁波はプラズマ中に浸透出来るが，この場合プラズマは完全に透明ではなくプラズマ中で吸収が起こる．松縄ら[13,14]は，プラズマ中でのレーザービームの吸収は逆制動放射（Inverse Bremsstrahlung）によることを提唱してきた．

逆制動放射[注1]は制動放射[注2]（Bremsstrahlung）の逆過程である．制動放射とは，プラズマ中で高速運動する電子が重いイオンに近づくとクーロン力で電子が加速され軌道が曲げられる．この時に電磁波が放出される現象を云う．逆制動放出では，電子に電磁波が作用すると，電子が電磁波エネルギーを吸収して加速される．

注1）逆制動輻射と同義語．　注2）制動輻射と同義語．

ハブとリムはアーク溶接されていたが，溶接変形が大きいため，溶接後仕上げ機械加工を必要とした．レーザー溶接では溶接後の変形が極めて少ないため，仕上げ加工工程が省略でき，かつ溶接速度が早いため，生産性向上およびコスト低減に大いに役立っている．

図40はレーザー溶接されたフューエルインジェクターバルブを示す．この部品の内部には精密な可動バルブが入っているために，溶接による変形は許されない．円周溶接に当たって，レーザービームを2本もしくは3本に分岐して同時に溶接を行うことにより，角変形の発生を防ぐ工夫がなされている．

自動車の動力伝達部品（パワートレイン）にもレーザー溶接が多用されている．図41に変速機ギヤの溶接例を示す．

自動車のボディ関係にもレーザー溶接が広く使われている．最も普及しているのがレーザー・テーラード・ブランク溶接である．図42に自動車ボディ側面パネルのテーラードブランク溶接の製法プロセスを示す．本方式では，先ず最終パネルを分割しブランク材を作り，これを集めて平面上で高速レーザー溶接を行い，素材を結合する．この場合，各部位の必要強度に合わせて板厚を変えて溶接する．ついで，結合パネルをプレス加工して最終パネルを製作する．

テーラードブランク溶接の利点は，各部位の必要強度に合わせて板厚を返られるので，従来の一枚板からのパンチ・プレス法に比べて重量軽減が図れる．また，ブランク材化することにより，材料の歩留まりが著しく向上する．一方，溶接箇所を塑性加工するため，われが発生する危険があり，溶接設計，溶接条件および材料選定には細心の注意が必要である．

また，ボディ組み立て工程においても，従来の抵抗スポット溶接に変わってレーザーによる断続溶接が部分的

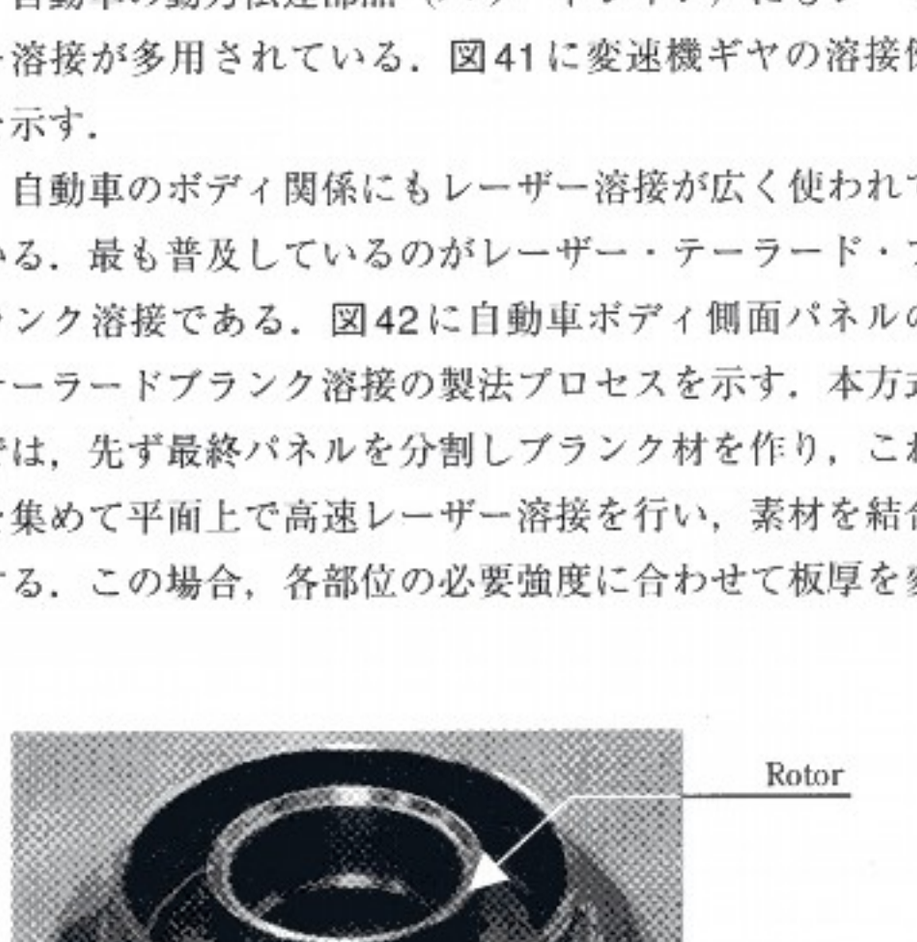


図39　マグネットクラッチプーリー
（(株)デンソー提供）

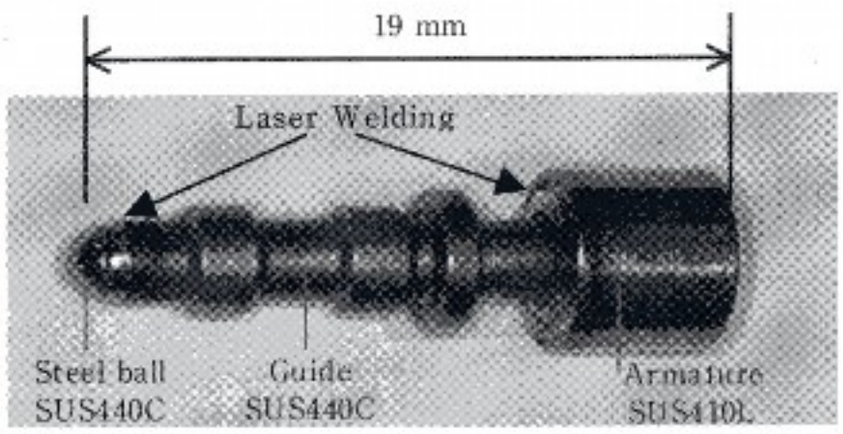


図40　フューエルインジェクターバルブ
（愛三工業(株) 提供）

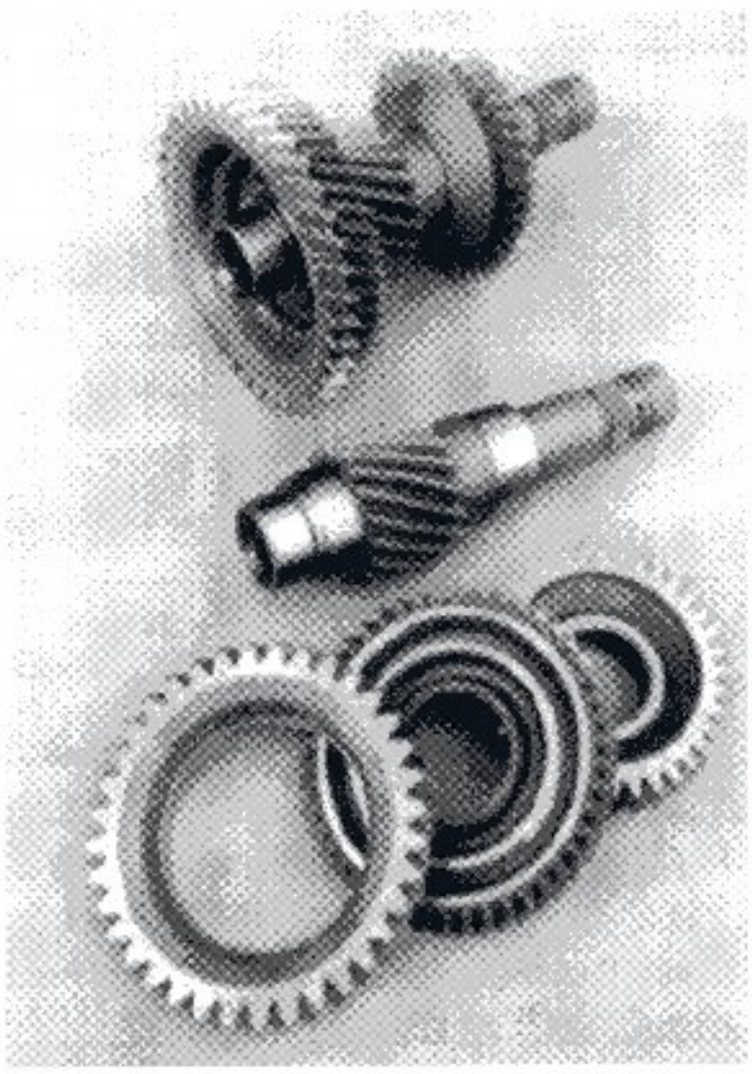


図41　変速機ギヤ（レーザー／高周波ハイブリッド溶接）
（Dr.E.Beyer提供）

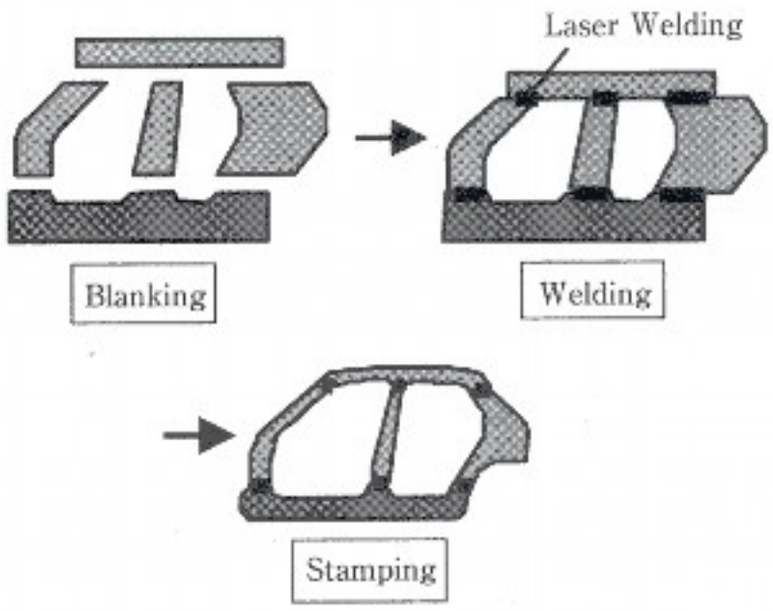


図42　テーラードブランク溶接
（(株) トヨタ自動車提供）